

論文98-35C-10-1

펄스방식의 핵자기 공명장치에 관한 새로운 구현방법

(New Implementation Method of the Pulsed Nuclear Magnetic Resonance Apparatus)

金 晴 月 *

(Cheong Worl Kim)

요 약

본 논문은 핵자기 공명신호를 검출하기 위하여 자석상자 내에 한 개의 코일을 가진 펄스방식의 핵자기 공명장치에 대한 새로운 구현방법에 관한 것이다. 수소 원자핵의 Larmor 주파수가 5MHz가 되도록 설계된 자석상자에 5MHz 고주파 자기장을 인가하여 자석상자 내에 투입된 글리세린 시료로부터 수소 원자핵의 공명신호를 얻었다. 자석상자 내의 정자기장은 자기장의 세기가 1168 gauss인 영구자석을 사용하여 만들었으며, 고주파 자기장은 5MHz의 주파수를 가지며 전류의 크기가 8A인 고주파 신호를 5.73 μ H의 코일에 인가하여 발생시켰다. 고주파 자기장의 발생시간을 2.8 μ sec로 하였을 때 핵자기 공명신호는 최대 크기로 나타났으며, 반복 검출을 하기 위하여 고주파 자기장의 발생주기를 100msec로 설계하였다. 시료에서 발산되어 자석상자 내의 코일에 감지되는 핵자기 공명신호는 Larmor 주파수와 같은 주파수를 가지는 신호가 진폭변조된 형태로 나타났다. 코일에 감지된 신호를 송수신 분리회로와 전치증폭기 및 중간증폭기에서 각각 20.7dB, 36dB 및 40dB로 증폭하고 동기검파회로에서 검파하여 핵자기 공명신호를 얻었다.

Abstract

This paper presents a new implementation method of the pulsed NMR(nuclear magnetic resonance) apparatus, which contains a single coil in a magnet console, to detect a NMR signal. Applying an RF magnetic field of 5MHz to the magnet console which is designed to have Larmor frequency of 5MHz for hydrogen atom, the hydrogen NMR signal was obtained from the glycerin which was put in the magnet console as a sample. The DC magnetic field in the magnet console was implemented with a permanent magnet of 1168 gauss and the RF magnetic field was generated applying an RF signal with the frequency of 5MHz and the current magnitude of 8A to a coil of 5.73 μ H. The magnitude of the NMR signal was maximum when the RF magnetic field was generated for 2.8 μ sec, and the period of generating the RF magnetic field was designed to 100msec for detecting the NMR signal repeatedly. The NMR signal, radiated from the sample in the magnetic console, was appeared as an amplitude-modulated signal with a frequency equal to the Larmor frequency. The signal, induced in the coil, was amplified in the tx/rx separation circuit, preamplifier and intermediate amplifier by a factor of 20.7dB, 36dB and 40dB, respectively, and the signal was detected by a synchronous detection circuits, then the NMR signal was obtained.

* 正會員, 安東大學校 師範大學 電子工學教育科
(Department of Electronics Engineering Education,
College of Education, Andong National University)
接受日字:1998年7月22日, 수정완료일:1998年9月23日

I. 서 론

하나의 축을 중심으로 회전하고 있는 원자핵은 스핀 (spin)의 성질과 자기 모멘트를 가지고 있으며 자기장에 노출되면 에너지 준위가 분리된다는 가설이 1924

년 W. Pauli에 의하여 제안되었고, 원자핵의 축 회전수와 같은 주파수로 변하는 자기장 내에서는 원자핵이 에너지를 흡수하는 핵자기 공명현상은 1946년 Stanford 대학의 Felix Bloch와 Harvard 대학의 Edward M. Purcell에 의하여 발견되었다^[1]. 이러한 핵자기 공명현상은 모든 원자핵에서 발생하는 것이 아니라 수소나 탄소와 같이 양자와 중성자의 수가 홀수인 원자핵에서만 발생된다^[1,2].

핵자기 공명을 발생시키기 위하여 일정한 방향을 가지는 강한 정자기장 내에 시료를 투입하면 정자기장의 세기에 비례하는 핵의 에너지 준위 차가 발생하게 된다. 이러한 상태에서 원자핵의 축 회전수와 동일한 주파수를 가지는 고주파 자기장을 정자기장과 수직인 방향으로 인가하면 원자핵이 에너지를 흡수하게 되고, 고주파 자기장을 차단하면 원자핵이 평형상태로 되돌아오면서 흡수한 에너지를 방출하게 된다. 이 때 방출되는 에너지를 검출하여 물질의 화학적 성분 분석에 이용하게 된다. 핵자기 공명에 의한 물질 분석은 비파괴적이며 반복적으로 측정이 가능하여 화학, 생물 및 의학 분야 등에서 널리 쓰이고 있다^[1,2,6,8].

핵자기 공명을 일으키는 방법은 CW NMR(Continuous Wave Nuclear Magnetic Resonance)과 Pulsed NMR로 나누어진다^[2]. CW NMR에서는 일정한 방향을 가진 강한 정자기장과 이에 수직인 방향으로 고주파 자기장을 형성시키고, 두 자기장 내에 시료를 놓은 후에 고주파 자기장의 크기를 서서히 변화시키면서 시료에서 발산되는 핵자기 공명 신호를 검출한다. Pulsed NMR에서는 정자기장과 수직인 방향으로 형성시킨 고주파 자기장의 크기는 일정하게 유지하면서 고주파 자기장이 발생하는 시간을 조절하여 시료로부터 방출되는 핵자기 공명신호를 검출한다. CW NMR은 Pulsed NMR에 비하여 하드웨어 구성은 용이하지만 핵자기 신호 검출에 시간이 많이 걸리는 단점이 있어서 Pulsed NMR을 주로 사용하고 있다^[2].

Pulsed NMR을 구현하는 방법에는 고주파 자기장을 형성하고 시료로부터 방출되는 핵자기 공명신호를 감지하는 코일(coil)의 구조에 따라 두 가지로 분류된다. 첫 번째 구조에서는 고주파 자기장을 발생하는 코일과 핵자기 공명신호를 감지하는 코일이 각각 분리되어 존재하고^[3], 다른 한 구조에서는 고주파 자기장이 차단된 후에 고주파 자기장 발생에 사용되었던 코일을 이용하여 핵자기 공명신호를 감지한다^[4,5]. 첫 번째

구조는 정자기장을 형성하는 자석상자 내에 두 개의 코일이 내장되어야 하므로 자석상자가 커지는 단점이 있고, 두 번째 구조는 한 개의 코일을 사용하므로 고주파 자기장을 형성하기 위해 코일에 인가되는 고주파 신호와 코일로 감지되는 핵자기 공명신호를 적절히 분리해 내는 회로가 필요로 하게 된다.

본 논문은 Pulsed NMR 방법에서 자석상자 내에 한 개의 코일을 사용하여 고주파 자기장을 발생시키고, 고주파 자기장이 차단된 후에 같은 코일로부터 감지되는 핵자기 공명신호를 애널로그 신호 처리하여 물질 분석에 적합한 전기적 신호로 바꾸어 주는 핵자기 공명장치의 구현방법을 제안한다. 이를 구현하기 위하여 기존에 제안된 핵자기 공명신호의 검출방법^[3]과 한 개의 코일을 사용한 자석상자에서 핵자기 공명신호를 분리하는 방법^[4]을 이용하였다.

본 논문의 2장에서는 핵자기 공명의 기본 원리와 핵자기 공명이 발생하는 자석상자의 구조에 기술하였으며, 3장에서는 설계된 펄스방식의 핵자기 공명장치의 구조와 세부 기능에 대한 상세한 설명 및 주요 부분에 대한 등가회로가 주어지고 있다. 제작된 핵자기 공명장치의 실험 결과는 4장에 주어지고 있으며, 5장에서는 향후의 연구 방향에 대하여 기술하였다.

II. 핵자기 공명

1. 핵자기 공명의 기본 원리

물질 내에서 회전 자기모멘트를 가지는 원자핵들은 임의 배열을 하고 있으므로 전체적으로 볼 때 물질은 자성을 띠지 않게 되지만, 일정한 방향의 강한 정자기장 속에 물질을 두게 되면 원자핵은 정자기장의 방향으로 정렬하게 되면서 세차운동을 하게 된다. 그림 1의 (a)에 주어진 바와 같이 세차운동이란 원자핵 자신이 회전하면서 회전축 자체도 회전하는 현상을 말한다. 이 때 원자핵은 정자기장의 방향을 중심으로 자기장의 세기에 비례하는 일정한 주파수로 세차운동을 하게 된다. 이 주파수를 Larmor 주파수라 하며, 식(1)과 같이 주어진다^[2].

$$f_{Larmor} = \frac{\gamma}{2\pi} B_0 \quad (1)$$

여기서, f_{Larmor} 는 Larmor 주파수, γ 는 해당 원자핵의 자기회전비율(gyro-magnetic ratio), B_0 는 정자

기장의 세기를 각각 나타낸다. 예를 들어 수소원자핵의 경우에는 $\gamma = 2.675 \times 10^4 \text{ gauss}^{-1}\text{sec}^{-1}$ 임으로 $B_0 = 1000 \text{ gauss}$ 인 경우에는 Larmor 주파수는 4.28MHz가 된다.

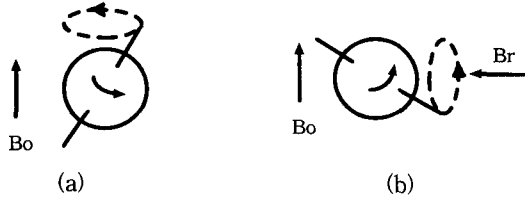


그림 1. 정자기장(B_0) 내에서 원자핵의 세차운동 (a) 고주파 자기장(B_r)이 없는 경우 (b) 고주파 자기장이 존재하는 경우

Fig. 1. Precession of atom within a magnetic field (B_0). (a) Without a radio frequency magnetic field (B_r) (b) With a radio frequency magnetic field

그림 1의 (b)와 같이 원자핵에 인가되는 정자기장의 방향과 수직인 방향으로 Larmor 주파수 값을 가지는 고주파 자기장을 인가하면 원자핵은 에너지를 흡수하여 세차운동의 회전축의 기울기가 변화하면서 핵자기 공명이 발생하게 된다. 흡수되는 고주파 자기장의 주파수는 정자기장의 세기에 따라 달라지며 대략 1MHz에서 600MHz 사이에 존재한다.

회전축의 기울기 변화정도는 식(2)에 주어진 바와 같이 인가되는 고주파 자기장의 세기와 인가시간에 비례한다^[2].

$$\theta = \gamma B_r t_p \quad (2)$$

여기서, θ 는 원자핵의 회전축의 회전각, B_r 은 고주파 자기장의 세기 및 t_p 는 고주파 자기장의 인가시간을 각각 나타낸다. 회전축을 90° 회전시키는데 필요한 인가 시간 t_p 는 식(2)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_p = \frac{\pi}{2 \gamma B_r} \quad (3)$$

고주파 자기장에 의하여 핵의 회전축이 90° 회전된 상태에서 고주파 자기장을 제거하여 핵이 평형상태로 이동할 때가 핵자기 공명신호의 크기는 최대가 된다^[2].

정자기장을 형성하는 자석상자 내의 모든 공간에

서 자기장의 세기가 일정한 경우에는 공명을 일으키는 Larmor 주파수가 모든 공간에서 일정하지만, 자석상자의 설계적인 한계와 시료의 영향 등으로 인하여 자석상자 내의 정자기장 세기가 위치에 따라 불 균일하게 되어 Larmor 주파수는 자석상자 내의 위치에 따라 달라지게 된다^[2,7]. 이로 인하여 고주파 자기장을 제거하면 원자핵의 회전축이 회전된 각도에서부터 원래 상태로 복귀하면서 고주파 자기장의 주파수와 Larmor 주파수의 차에 해당하는 주파수를 가지며 지수 함수적으로 감소하는 핵자기 공명신호가 시료에서부터 방출되게 된다. 이를 FID(Free Induction Decay) 신호라고 한다.

2. 자석상자

일정한 방향을 가진 강한 정자기장은 영구자석, 전자석 혹은 초전도자석 등을 사용하여 형성하고, 고주파 자기장은 코일에 고주파 전류를 흘려서 형성한다. 본 논문에서 정자기장을 형성하기 위해 사용된 영구자석과 고주파 자기장을 형성하기 위해 사용된 코일을 내장한 자석상자는 그림 2와 같은 내부 구조를 가진다^[6].

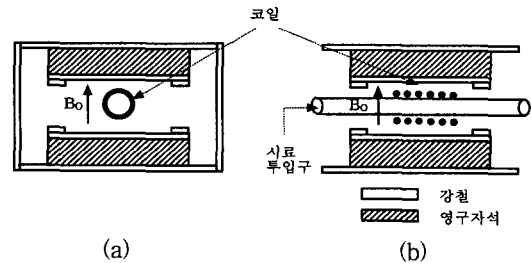


그림 2. 자석상자의 내부 구조 (a) X-Y 단면 (b) Y-Z 단면

Fig. 2. Internal structure of a magnet console. (a) X-Y plane (b) Y-Z plane

그림 2에 주어진 바와 같이 영구자석에 의하여 일정한 방향의 강한 정자기장 B_0 가 형성되고, 코일에 흐르는 고주파 전류에 의하여 정자기장과 수직인 방향 즉 시료 투입구 방향으로 고주파 자기장이 형성된다. 펄스방식의 핵자기 공명장치에서는 핵의 회전축이 90° 회전할 시간만큼 자석상자 내에 있는 코일에 전류를 흘려 고주파 자기장을 형성시키고, 코일에 흐르는 전류를 차단하여 고주파 자기장을 소멸시키면서 시료에서부터 발산되는 핵자기 공명신호가 자석상자 내에 있는 코일에 감지된다.

Ⅲ. 시스템 설계

1. 동작 원리

핵자기 공명장치는 자석상자와 신호처리장치로 구성된다. 자석상자는 정자기장과 고주파 자기장을 형성하고 핵자기 공명신호를 감지하는 데 사용되며, 신호처리장치는 고주파 자기장 유기에 필요한 신호 발생과 자석상자의 코일에 감지된 핵자기 공명신호를 신호 처리하여 FID 신호를 검출하는 기능을 수행한다^[8].

신호처리장치는 고주파 신호 발생부, 송수신 분리회로 및 FID 신호 처리부로 나누어지며, 이에 대한 기능별 구성도는 그림 3에 주어져 있다.

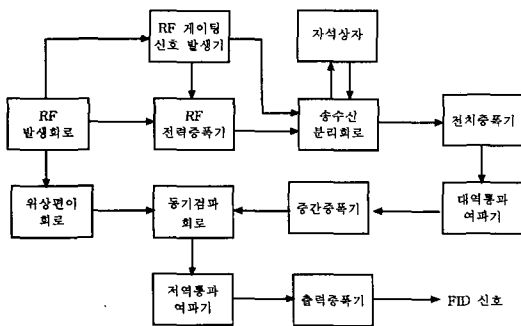


그림 3. 펄스방식 핵자기 공명장치에 대한 기능별 구성도

Fig. 3. Functional block diagram of the pulsed NMR apparatus.

그림 3에서 고주파 신호 발생부는 RF(Radio Frequency) 발생회로, RF 게이팅(gating) 신호 발생기 및 RF 전력증폭기로 구성된다. RF 발생회로는 자석상자 내에 있는 코일을 이용하여 고주파 자기장 발생에 필요한 고주파 신호를 발생하여 RF 전력증폭기에 공급하고, RF 게이팅 신호 발생기는 고주파 자기장을 형성하는 시간과 그 주기에 해당되는 신호를 만들어 RF 전력증폭기에 공급한다. RF 전력증폭기에서는 RF 발진회로와 RF 게이팅 신호 발생회로의 출력신호를 받아서 RF 게이팅 신호가 동작되는 시간 동안에만 RF 신호를 전력증폭한 후에 송수신 분리회로를 통하여 자석상자 내에 있는 코일을 구동하여 고주파 자기장이 발생되도록 한다.

송수신 분리회로는 RF 게이팅 신호가 동작되는 시간 동안에는 전력증폭된 고주파 신호를 자석상자 내에 있는 코일에 공급하고, RF 게이팅 신호가 차단되어 코일에 인가되는 고주파 신호가 사라지면 고주파 자기

장이 소멸하면서 시료에서 발산되어 코일에 유기되는 핵자기 공명신호를 전치증폭기로 공급하는 역할을 수행한다.

FID 신호 처리부는 전치증폭기, 대역통과여파기, 중간증폭기, 위상편이회로, 동기검파회로, 저역통과여파기 및 출력증폭기로 구성된다. 송수신 분리회로를 통하여 전치증폭기의 입력에 나타나는 수 μV 의 핵자기 공명 신호는 전치증폭기에서 전압증폭되어 대역통과여파기로 보내어진다. 핵자기 공명신호는 코일에 인가된 고주파 신호가 진폭 변조된 형태로 나타나므로 신호대잡음비를 개선하기 위하여 대역통과여파기를 통과시키고 중간증폭기에서 증폭된 후에 동기검파회로로 보내어진다.

동기검파에 필요한 90° 위상 차를 가진 고주파 신호는 RF 발생회로의 출력신호를 90° 위상편이시키는 위상편이회로를 통하여 얻어진다. 90° 위상편이된 고주파 신호와 중간증폭기의 출력에 나타나는 진폭 변조된 핵자기 공명신호는 동기검파회로에서 곱해진다. 동기검파회로의 출력은 저역통과여파기를 통과하면서 고주파 신호의 주파수에 2배에 해당되는 신호 성분은 소멸되고 검파된 핵자기 공명신호 즉 FID 신호만이 저역통과여파기의 출력에 나타나게 된다. 출력증폭기는 FID 신호를 에이디이 변환이나 다른 신호처리에 적합하도록 증폭한다.

2. 회로 설계

본 논문에서는 식 (1)에 의하여 주위 온도가 $30^\circ C$ 에서 수소 원자핵의 Larmor 주파수가 5MHz가 되도록 정자기장의 세기를 가지는 영구자석으로 설계된 자석상자를 이용하여 펄스방식의 핵자기 공명 장치를 설계하였다.

(1) RF 발생회로와 위상편이회로

고주파 자기장을 발생시키는 고주파 신호와 동기검파에 사용되는 위상편이된 고주파 신호사이의 위상 차이는 온도 변화나 부품 값의 편차에 관계없이 90° 를 일정하게 유지하여야만 동기검파회로에서 두 신호의 위상 변화로 인한 검파된 FID 신호 특성 변화를 최소화시킬 수 있다. 본 논문에서는 그림 4에 주어진 디지털 위상편이회로를 사용하여 애널로그 위상편이회로에서 온도 변화나 부품 값의 편차 등으로 인하여 위상편이 값이 변화하는 문제점을 해결하였다.

그림 4에 주어진 바와 같이 RF 발생회로와 위상편

이회로는 4단 링(ring) 계수기로 구성되며, 출력 신호 RF0와 RF1은 각각 고주파 자기장을 유기하는데 사용되는 구형파 신호와 동기검파에 사용되는 위상 편이된 정현파 신호를 나타낸다. 그림 4에서 출력 신호 RF0와 D 플립플롭(flipflop) U2A의 출력신호 RF90은 4단 링 계수기에 의해서 항상 90° 의 위상 차를 유지하면서 링 계수기의 클락(clock) 신호 CLK의 주파수에 4분주된 값의 주파수를 가지는 구형파로 나타난다. 따라서, 링 계수기는 고주파 신호의 주파수에 4배의 주파수 값을 가지는 구형파를 클락신호로 사용하여야 한다. 본 논문에서는 20MHz 구형파를 링 계수기의 클락신호로 사용하였다. 출력신호 RF0와 RF90의 펄스폭 비율을 50%를 유지하기 위하여 초기화 펄스신호 RST에 의하여 D 플립플롭 U1A와 U1B는 프리셋(preset)가 되고, D 플립플롭 U2A와 U2B는 클리어(clear)가 되도록 설계하였다. 위상 편이된 구형파 신호 RF90은 중심주파수를 5MHz로 하는 대역통과여파기를 통과하면서 동기검파에 사용되는 위상 편이된 정현파 신호 RF1으로 바뀌어진다.

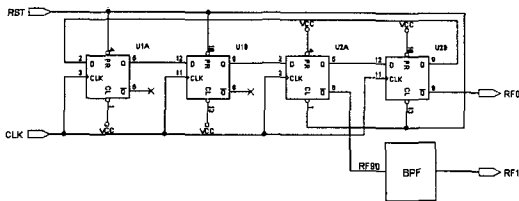


그림 4. 위상편이회로의 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuits of the phase shifter.

(2) RF 게이팅 신호 발생기

자석상자 내의 코일에 인가되는 고주파 자기장의 발생시간과 그 주기를 결정하는 RF 게이팅 신호 발생기의 등가회로는 그림 5에 주어져 있다. 그림 5에서 발진회로의 출력신호의 주기에 의하여 고주파 자기장의 발생주기가 결정되고, 프로그래머블 계수기 U1과 U2 및 클락신호 CLK에 의하여 고주파 자기장의 발생시간이 결정된다.

초기화 펄스신호 RST에 의하여 고주파 자기장의 발생을 제어하는 게이팅 펄스신호 GATE가 low 상태로 초기화되는 D 플립플롭 U3A는 발진회로의 출력신호의 상승 에지(edge)에서 게이팅 펄스 신호 GATE가 high 상태로 바뀐다. 이와 동시에 적재(load) 동작 상태에 있던 프로그래머블 계수기 U1과 U2가 동작하

여 스위치 값과 계수기의 클락신호 CLK에 의하여 결정되는 일정한 시간이 경과한 후에 계수기 U1의 출력신호 RCO가 high 상태로 되면서 D 플립플롭 U3A를 클리어시킴으로 게이팅 펄스신호 GATE는 low 상태로 된다. 발진회로의 출력신호가 low 상태로 되면 프로그래머블 계수기는 다음 게이팅 펄스신호를 발생하기 위하여 적재동작 상태를 유지한다. 위와 같은 동작이 되풀이되면서 고주파 자기장의 발생을 제어하는 게이팅 펄스신호가 만들어진다.

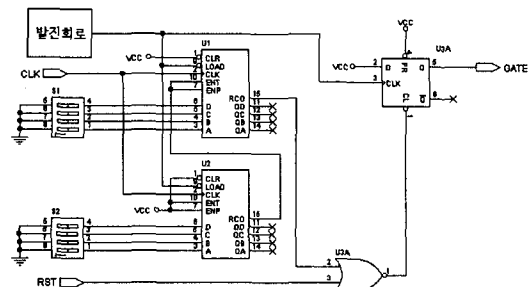


그림 5. RF 게이팅 신호 발생기의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuits of the RF gating signal generator.

본 논문에서는 고주파 발생주기가 100msec가 되도록 발진회로를 설계하였으며, 프로그래머블 계수기의 클락신호로는 5MHz의 구형파를 사용함으로써 고주파 자기장을 유기하는 고주파 신호의 주기에 2배에서 256배까지 게이팅 펄스신호의 펄스 폭을 만들 수 있도록 설계하였다. 따라서, 본 논문에서 게이팅 펄스신호의 펄스 폭은 스위치 S1과 S2의 값에 따라서 $0.4 \mu\text{sec}$ 에서부터 $51.2 \mu\text{sec}$ 까지 변화시킬 수 있다.

(3) RF 전력증폭기

RF 전력증폭기를 등가회로로 나타내면 그림 6에 주어진 바와 같다. 그림 6에서 입력신호 GATE와 RF0은 각각 RF 게이팅 신호 발생기의 출력신호인 게이팅 펄스신호와 RF 발생회로의 고주파 신호를 나타낸다. 게이팅 펄스신호 GATE에 의하여 고주파 신호 RF0은 AND 게이트 U2A와 U2B에 의하여 고주파 자기장이 발생시간 동안에만 게이팅되면서 전력증폭이 이루어진다. 인버터 버퍼인 U3과 U4는 TTL 논리회로 출력신호를 +15V 논리회로의 출력신호로 변환해주는 역할을 하고, PMOS 트랜지스터 Q1과 NMOS 트랜지스터 Q2로 구성된 고속 인버터 회로는 NMOS 출력 트랜지스터 Q5 구동하는 역할을 한다. 마찬가지로

로, 트랜지스터 Q3과 Q4로 구성된 인버터 회로는 출력 트랜지스터 Q6을 구동하는 역할을 한다. 게이팅 펄스 신호 GATE가 high 상태 하에서 고주파 신호 RF0가 high 상태가 되면 출력 트랜지스터 Q6이 동작되고, 고주파 신호 RF0가 low 상태로 되면 출력 트랜지스터 Q5가 동작되어 펄스 트랜스포머 T1의 출력에는 $\pm 400V$ 의 구형파 즉 게이팅된 RF 신호 GRF가 나타나게 된다.

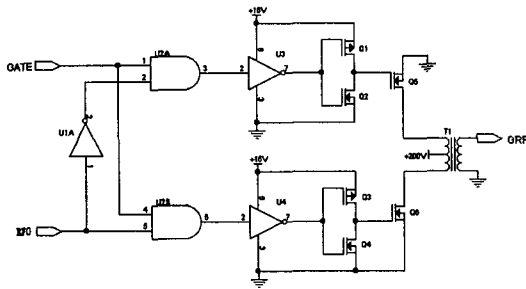


그림 6. RF 전력증폭기의 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuits of the RF power amplifier.

(4) 송수신 분리회로

고주파 자기장을 발생할 경우에는 전력증폭된 고주파 신호를 자석상자 내에 있는 코일에 인가하고, 고주파 신호가 차단되어 고주파 자기장이 소멸되는 경우에는 시료에서 발생되어 코일에 감지되는 핵자기 공명 신호를 전치증폭기로 보내주는 역할은 그림 7에 주어진 송수신 분리회로에 의하여 이루어진다.

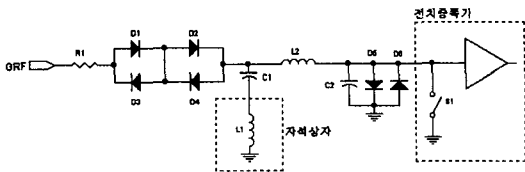


그림 7. 송수신 분리회로의 등가회로
Fig. 7. Equivalent circuits of the Tx/Rx separation circuit.

그림 7에서 콘덴서 C1은 자석상자 내에 있는 코일 L1과 고주파 신호의 주파수 즉 5MHz에서 직렬공진이 되도록 그 값을 결정하고, 코일 L2는 5MHz에서 리액턴스가 ∞ 이상이 되도록 인덕턴스 값을 결정 한 후에 5MHz에서 직렬공진이 되도록 콘덴서 C2의 값을 결정한다.

$\pm 400V$ 크기의 게이팅된 RF 신호 GRF가 저항

R1을 통하여 다이오드 D1과 D3에 나타나면 게이팅된 RF 신호의 극성에 따라 다이오드 D1과 D2가 동작(차단)상태가 되고 D3과 D4가 차단(동작)상태가 되어 콘덴서 C1과 코일 L2에 나타나게 된다. 이 때 전치증폭기에 있는 퀘칭(quench) 회로의 NMOS 스위치 S1이 동작되어 콘덴서 C2는 무시되므로 코일 L2와 콘덴서 C2의 직렬 공진회로는 사라지면서 코일 L2의 리액턴스로 인하여 대부분의 고주파 신호의 전류는 직렬공진을 형성하는 콘덴서 C1과 코일 L1으로 흐르게 된다. 이 때 코일 L1에 흐르는 전류에 의하여 고주파 자기장이 형성되며, 코일 L1에 흐르는 전류량은 저항 R1에 의하여 결정된다.

게이팅된 RF 신호가 차단되면 코일 L1에 발생되었던 고주파 자기장이 사라지면서 NMOS 스위치 S1이 동작상태로 된다. 시료에서 방출되어 코일 L1에 유기되는 핵자기 공명신호의 크기는 수 μV 정도이므로 그림 7의 모든 다이오드 D1-D6가 차단상태가 되면서 저항 R1은 콘덴서 C1과 코일 L2로부터 분리된다. 따라서, 유기된 핵자기 공명신호는 코일 L1과 콘덴서 C1으로 구성된 직렬공진회로 통과하여 코일 L2와 콘덴서 C2로 구성된 직렬공진회로에 나타난다. 직렬공진 회로의 특성에 의하여 콘덴서 C2에 나타나는 신호 크기 V_{C2} 는

$$V_{C2} = -j QV\phi \tag{4}$$

로 주어진다. 여기서, Q는 코일 L2와 콘덴서 C2에 의하여 결정되는 선택도를 나타내며, $V\phi$ 는 코일 L1에 유기되는 핵자기 공명신호를 나타낸다.

다이오드 D5와 D6은 전치 증폭기의 퀘칭회로와 더불어 게이팅된 RF 신호가 순간적으로 차단될 때 발생하는 링잉(ringing) 신호를 흡수하여 링잉신호의 지속 시간을 단축시킴으로써 고주파 자기장의 차단과 동시에 나타나는 핵자기 공명신호의 손실을 최소화시킨다.

본 논문에서는 저항 R1은 50Ω , 코일 L1은 $5.73 \mu H$, 콘덴서 C1은 $177 pF$, 코일 L2는 $4.6 \mu H$ 및 콘덴서 C2는 $220 pF$ 을 사용하였으며, 코일 L2의 선택도 Q는 10.8이었다.

(5) 전치증폭기

그림 8에 주어진 전치증폭기는 고 입력 저항을 가진 저 잡음 증폭기와 퀘칭회로로 구성된다. 저 잡음 증폭기에서는 이중 게이트 NMOS 트랜지스터를 이용하여 초단 증폭기를 구성함으로써 그림 7의 송수신 분

리회로에서 콘덴서 C2의 양단에 나타나는 핵자기 공명신호 V_{Ω} 의 손실을 최소화시킨다. Larmor 주파수를 반송파 신호의 주파수로 하여 진폭 변조된 신호 형태로 나타나는 핵자기 공명신호는 트랜지스터 Q1, 코일 L1 및 콘덴서 C1으로 구성되는 증폭기에서 신호대 잡음비를 개선하기 위하여 5MHz의 중심주파수에서 동조증폭이 된다. 본 논문에서는 전치증폭기가 5MHz에서 전압이득이 36dB가 되도록 설계하였다.

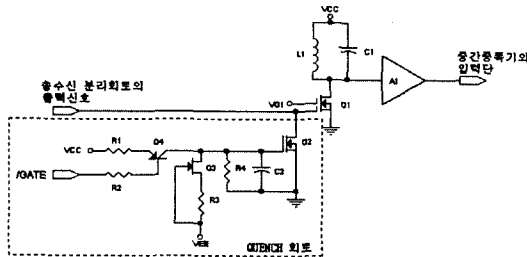


그림 8. 전치증폭기의 등가회로
Fig. 8. Equivalent circuits of the pre amplifier.

고주파 자기장을 유도하기 위해 자석상자 내의 코일에 인가되는 고주파 신호는 게이팅 펄스신호 GATE가 low로 될 때 순간적으로 차단되므로 링잉 현상이 나타나게 되어 핵자기 공명신호의 감지에 악영향을 미친다. 이를 최소화하기 위하여 그림 8에서 콘덴서 C2와 트랜지스터 Q2 및 그 주변회로로 구성된 퀘치회로를 사용한다.

고주파 신호가 자석상자 내의 코일에 인가되는 순간에 반전된 게이팅 펄스 신호 /GATE에 의하여 트랜지스터 Q4가 동작되면서 콘덴서 C2에 전압이 충전되어 트랜지스터 Q2가 동작되므로 트랜지스터 Q1의 게이트는 접지로 연결된다. 반전된 게이팅 펄스 신호 /GATE가 high 상태로 되면 트랜지스터 Q4는 차단되지만, 콘덴서 C3에 충전된 전압은 JFET Q3와 저항 R4로 구성되는 전류원에 의하여 방전되면서 트랜지스터 Q2를 서서히 차단시킨다. 이는 고주파 자기장을 유도하는 신호의 순간 소멸로 나타나는 링잉신호의 지속시간을 최소화하여^[4,5] 고주파 자기장의 소멸과 동시에 나타나는 핵자기 공명신호가 링잉신호에 묻혀 버리는 현상을 최소화시킨다.

(6) 신호 처리부

신호 처리부는 중간증폭기, 동기검파회로 및 출력증폭기로 구성된다. 중간증폭기는 그림 9에 주어진 바와 같이 코일 L1과 L2 및 콘덴서 C1과 C2로 구현된 두

개의 대역통과여파기와 두 개의 증폭기 A1과 A2로 구성된다. 본 논문에서는 전치증폭기의 출력신호가 중간 증폭기에서 40dB 증폭이 이루어지도록 설계하였다.

중간증폭기의 출력신호는 90° 위상편이된 고주파 신호와 곱해지면서 동기검파가 이루어진다. 동기검파회로의 출력신호는 저역통과여파기를 지나면서 반송파 주파수의 2배가 되는 신호 성분은 소멸되고 베이스 밴드(baseband)로 이동된 핵자기 공명신호 즉 FID 신호만 남는다. FID 신호는 에이디이 변환기나 기타 다른 신호처리 시스템에 적합하도록 증폭기 A3에서 전압증폭을 하여 최종적인 FID 신호를 얻는다. 그림 9에서 저역통과여파기는 차단주파수가 50KHz인 3차 Butterworth 여파기로 설계하였으며, 출력증폭기 A3의 전압이득은 20dB에서 40dB까지 변화시킬 수 있도록 설계하였다.

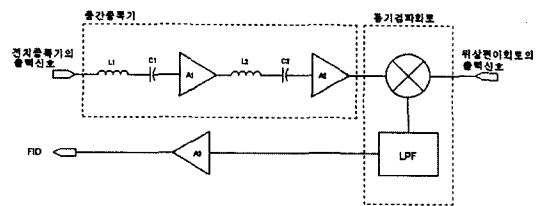


그림 9. 신호 처리부의 등가회로
Fig. 9. Equivalent circuits of the signal processing part.

IV. 실험 결과

본 논문에서는 수소 원자핵의 Larmor 주파수가 5MHz가 되도록 제작된 자석상자에 사용하여 핵자기 공명장치에 대한 실험을 수행하였다. 수소 원자핵의 공명신호를 측정하기 위하여 글리세린을 시료로 사용하였으며, 정자기장과 수직한 방향으로 인가하는 고주파 자기장의 발생주기와 발생시간은 각각 100msec와 2.8 μsec로 하였다.

자석상자 내의 코일에 유기되어 송수신 분리회로와 전치증폭기에서 각각 20.7dB와 36dB 증폭되고 중간 증폭기에서 40dB 증폭된 핵자기 공명신호가 그림 10에 주어져 있다. 그림 10에서 (a)는 자석상자 내에 시료가 없어 핵자기 공명이 발생하지 않는 경우에 중간 증폭기의 출력신호를 나타내며, 그림 10에서 (b)는 자석상자 내의 시료 투입구에 글리세린을 투입하여 핵자기 공명이 발생하였을 경우에 중간증폭기의 출력신호

를 나타낸다.

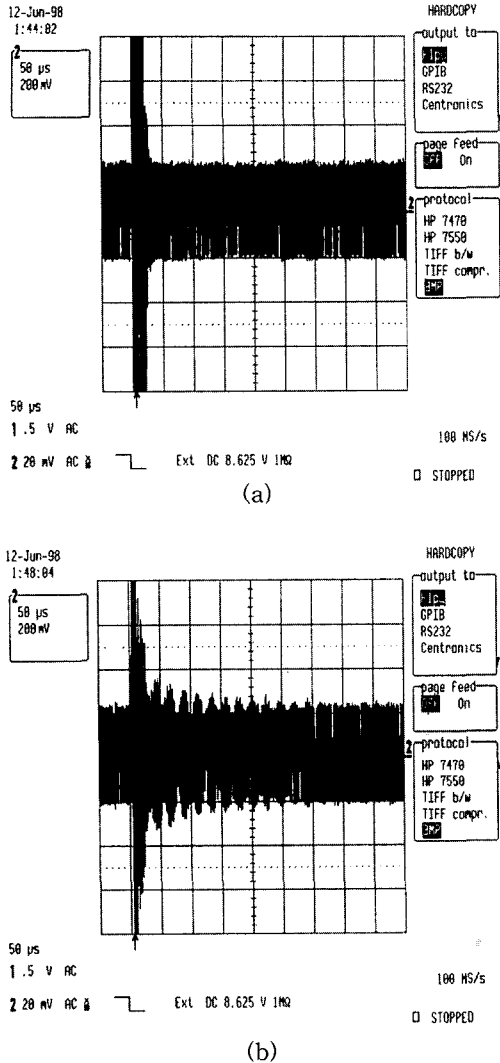


그림 10. 중간증폭기의 출력신호 (a) 핵자기 공명이 발생하지 않은 경우 (b) 핵자기 공명이 발생한 경우
 Fig. 10. The output signal of the intermediate amplifier. (a) When the off-resonance (b) When the on-resonance

본 논문에서는 자석상자 내의 코일에 유기되는 수 μV 크기의 핵자기 공명신호의 신호대잡음비를 개선하기 위하여 그림 7의 송수신 분리회로와 그림 8의 전치증폭기에서 각각 2차 대역통과여파기를 사용하였으며, 그림 9의 중간증폭기에서는 2개의 2차 대역통과여파기를 사용하였다. 사용된 대역통과여파기의 중심주파수는 5MHz이고, 송수신 분리회로와 전치증폭기의 대역통과여파기의 선택도 Q는 각각 10.8과 240.3이며,

중간증폭기에 사용된 2개의 대역통과여파기의 선택도 Q는 각각 15.7이다. 그림10의 (a)에 주어진 바와 같이 핵자기 공명이 발생하지 않은 경우에 96.7dB의 전압 증폭으로 인하여 중간증폭기의 출력에 나타나는 신호는 접지선이나 전원선을 통하여 유기된 고주파신호 성분이다. 이러한 불필요한 고주파 신호의 유기를 최소화하기 위하여 송수신 분리회로와 전치증폭기는 실딩 (shielding)을 하였으며, 자석상자는 접지를 시켰다.

그림 10의 (b)에 나타난 바와 같이 자석상자 내의 코일에 유기되는 핵자기 공명신호는 Larmor 주파수 즉 고주파 자기장을 유도하기 위하여 사용되는 고주파 신호의 주파수를 반송파의 주파수로 하여 진폭 변조된 신호 형태로 나타난다. 이는 고주파 자기장에 의하여 원자핵의 회전축이 기울어진 상태에서 Larmor 주파수로 세차운동을 하고 있던 원자핵이 고주파 자기장이 소멸되면서 회전축이 원래 상태로 복귀할 때 세차운동의 축 회전 주파수는 그대로 유지하면서 흡수한 에너지를 방출하기 때문이다. 원자핵이 Lamor 주파수로 세차운동을 하는 것은 정자기장에 의하여 이루어지므로 고주파 자기장과는 무관하며, 고주파 자기장은 원자핵의 회전축의 기울기 변화에만 관계가 있다.

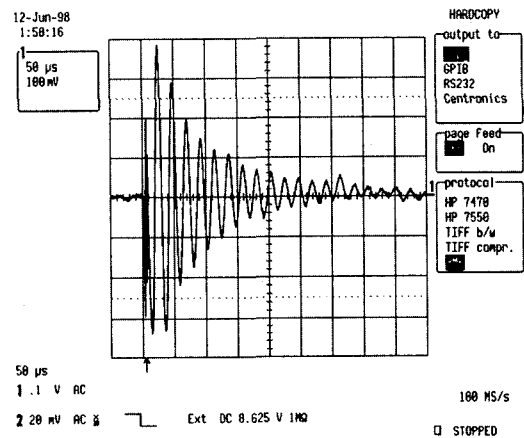


그림 11. 동기검파된 핵자기 공명신호
 Fig. 11. The NMR signal processed by synchronous detection.

중간증폭기의 출력신호를 동기검파한 결과는 그림 11에 주어져 있다. 그림 11에서 주파수 성분은 Larmor 주파수와 고주파 자기장의 주파수 차이에 의하여 발생된다. 이는 자석상자의 제작의 한계와 시료의 영향 등으로 자석상자 내의 위치에 따라 정자기장의 세기가 불 균일하게 되면서 원자핵의 위치에 따라

Larmor 주파수가 차이가 나기 때문이다.

그림 11에 나타난 바와 같이 동기검파된 핵자기 공명 신호는 시간에 따라 감소하는 형태로 나타나므로 FID(Free Induction Decay) 신호라 한다. FID 신호의 크기는 측정시료인 글리세린에 존재하는 수소 원자핵의 절대적인 수에 비례하므로 시료의 질량에 따라 달라지게 되며, 이완시간(decay time)은 같은 질량의 시료에서는 수소 원자핵의 포함 비율에 따라 달라지게 된다. 따라서 자석상자 내의 시료투입구의 용량이 결정되면 FID 신호의 이완시간을 측정하여 수소 원자핵의 포함 비율 즉 수분량을 측정할 수 있으며, FID 신호의 크기와 이완시간을 이용하여 시료의 질량을 측정할 수 있다^[2,6,8].

고주파 자기장 발생에 사용되는 고주파 신호를 만들기 위하여 RF 전력증폭기의 NMOS 출력 트랜지스터를 구동하는 신호와 전력 증폭된 고주파 신호의 모양은 각각 그림 12와 그림 13에 주어져 있다. 그림 13에 주어진 고주파 신호는 파형 측정을 위하여 그 크기를 1/2만큼 감쇄시킨 파형이다.

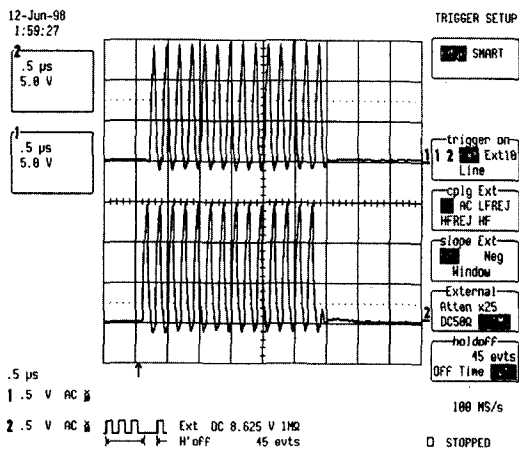


그림 12. RF 전력증폭기의 NMOS 출력 트랜지스터를 구동하는 신호
Fig. 12. The driving signals for the NMOS output transistors of the RF power amplifier.

고주파 자기장의 발생을 제어하는 게이팅 펄스 신호가 high 상태가 되면 그림 12에 나타난 바와 같이 위의 파형과 아래 파형이 서로 반전되면서 RF 전력 증폭기의 NMOS 출력 트랜지스터를 교대로 구동하여 고주파 신호의 전력증폭이 이루어지고, 게이팅 펄스 신호가 low 상태로 되면 구동신호가 모두 low 상태

로 되면서 NMOS 출력 트랜지스터를 off 시켜 고주파 신호의 전력증폭이 차단되어 고주파 자기장이 소멸된다.

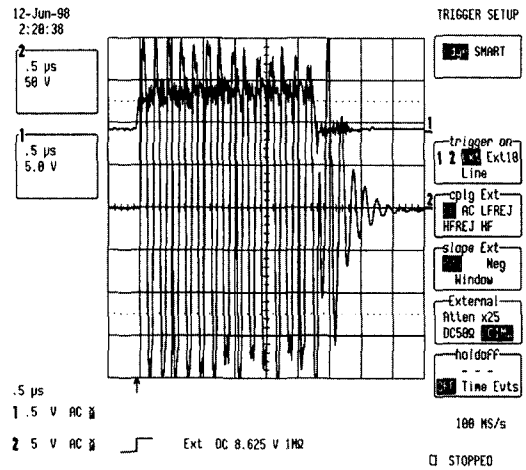


그림 13. 1/2만큼 감쇄시킨 RF 전력증폭기의 출력신호
Fig. 13. The output signal of the RF power amplifier reduced by a factor of two.

그림 13에서 파형 1은 고주파 자기장 발생을 제어하는 게이팅 펄스신호를 나타내며 파형 2는 전력 증폭된 고주파 신호를 나타낸다. 그림 13에 나타난 바와 같이 게이팅 펄스신호가 차단되는 순간에 링잉신호가 발생하지만 송수신 분리회로의 다이오드 D5와 D6 및 전치 증폭기의 쿼치회로에 의하여 링잉신호가 급속히 감쇄하게 된다.

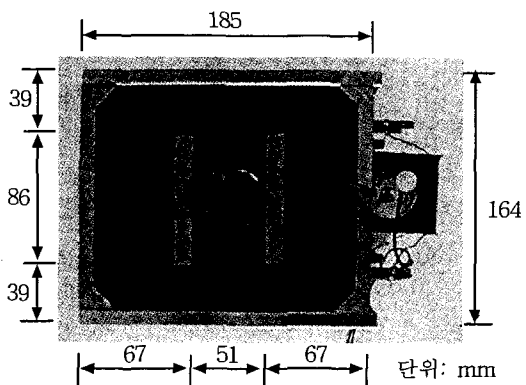


그림 14. 위에서 내려다 본 자석상자의 모습
Fig. 14. The top view of the magnet console.

그림 14는 본 논문에 사용된 자석상자를 나타낸다. 그림 14에서 중앙에 있는 시료 투입구를 중심으로 고

주파 자기장을 유도하는 코일이 내장되어 있으며, 오른쪽의 작은 사각통에 들어 있는 가변콘덴서는 그 값을 조정하여 자석상자 내의 코일과 직렬공진이 일어나도록 한다.

사용된 자석상자는 [7]에서 제안된 방법으로 제작되었으며 정자기장을 형성하는 영구자석은 주위 온도가 30°C에서 자기장의 세기가 1168 gauss이며, 자기장의 균일도는 그림 2에 주어진 X-Z 방향과 Y-Z 방향으로 각각 607.22ppm과 633.05ppm을 나타내었다. 그림 14에서 자석상자내의 영구자석의 크기는 폭, 길이 및 두께가 각각 86mm, 145mm 및 55mm이며 시료투입구의 직경은 38mm이다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존에 제안된 핵자기 공명신호 검출 방법^[3]과 송수신 회로의 분리방법^[4]을 이용하는 새로운 방식의 핵자기 공명장치를 제안하였다. 이는 자석상자 내에 한 개의 코일을 사용하여 고주파 자기장을 발생시키고, 시료로부터 발산되어 동일한 코일에 감지되는 핵자기 공명신호를 애널로그 신호처리하여 FID 신호로 검출하는 펄스방식의 핵자기 공명장치를 구현한 것으로서 실험을 통하여 검증하였다. 자석상자 내에 한 개의 코일을 사용하여 고주파 자기장을 발생시키고 시료에서 방출되는 핵자기 공명신호를 감지하게 함으로써 자석상자의 부피를 줄일 수 있도록 하였다. 온도의 변화나 부품 값의 편차에 의하여 발생하는 위상편이회로의 특성 변화가 핵자기 공명신호의 동기 검파에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 위상편이회로는 링 계수기를 이용한 디지털회로로 구현하였다. 프로그래머블 계수기를 사용하여 RF 게이팅 신호 발생기를 구현함으로써 고주파 자기장의 세기에 따라 핵자기 공명신호가 최대가 되도록 고주파 신호의 발생시간을 선택할 수 있게 하였다. 전력증폭된 고주파 신호가 코일에 인가되어 고주파 자기장을 발생시키고 게이팅 펄스신호에 의하여 순간적으로 차단될 때 발생하는 링잉신호는 핵자기 공명신호의 감지에 악영향을 미치므로 이를 억제하기 위하여 전치 증폭기에 켄치회로와 송수신 회로에서는 다이오드를 이용한 리미팅(limiting) 회로를 사용하였다.

주위 온도의 변화에 따라 영구자석의 자기장 세기가 변화하므로 핵자기 공명을 일으키는 주파수 즉

Larmor 주파수가 달라지게 되며, 동일한 방법과 재질을 사용하여 설계 제작된 자석상자들도 각각의 제작 한계와 영구자석의 정자기장 세기의 편차로 인하여 Larmor 주파수가 약간씩 달라지게 된다. 이와 같은 이유들로 인하여 고주파 자기장의 주파수와 Larmor 주파수의 차이가 큰 경우에는 핵자기 공명이 일어나지 않게 되므로 영구자석의 온도를 일정하게 유지하게 하고, 자석상자를 제작할 때 발생하는 정자기장의 차이를 보정해 줄 수 있는 장치에 대한 연구가 필요하다. 또한, 본 논문에 제작된 핵자기 공명장치는 1 개의 위상에 대한 공명 신호를 검출하므로 원자핵의 회전 주파수가 고주파 자기장보다 빠르지 느리지 알 수가 없지만, Fourier NMR 장치를 이용하면 원자핵의 회전 방향에 대한 정보를 얻을 수가 있으므로 이에 대한 연구도 필요하다.

다양한 물질을 분석하기 위해서는 보다 강한 정자기장이 요구되며 이에 따라 Larmor 주파수가 높아지므로 펄스방식의 핵자기 공명장치에 적합한 수십 MHz 대역의 RF 전력 증폭기에 대한 연구가 필요하다. 또한, 본 논문에서는 간단한 RF 게이팅 펄스 신호를 사용하지만, 게이팅 펄스신호의 인가기법에 따라 원자핵의 반응이 달라지는 현상을 이용하여 물질을 분석하는 연구가 활발하므로 이에 적합한 프로그램블 펄스 발생회로와 신호처리기법에 대한 연구도 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] David G. Gadian, "Nuclear magnetic resonance and its application to living systems," Clarendon Press, University of Oxford, 1982.
- [2] 김만수의 8인, "생물 자원의 비파괴 물성 측정," 문운당, pp. 213-258, 1998
- [3] W. Gilbert Clark, "Pulsed Nuclear Resonance Apparatus," The Review of Scientific Instruments, vol. 35, pp. 316-333, 1964.
- [4] W. Gilbert Clark and John A. McNeil, "Single Coil Series Resonant Circuit for Pulsed Nuclear Resonance," The Review of Scientific Instruments, vol. 44, pp. 844-851, 1973.
- [5] A. N. Garroway and D. Ware, "Improved

- recovery time in single coil pulsed NMR spectrometers," The Review of Scientific Instruments, vol. 46, pp. 1342-1343, 1975.
- [6] 조성인, "수소자기공명원리를 이용한 비파괴 농산물 함수율 측정장치 개발을 위한 기초실험," 한국농업기계학회지, 18권, 3호, pp. 252-261, 1992
- [7] 조성인, "벼 함수율의 핵자기 공명 센서용 자석 상자의 유한 요소 해석을 응용한 설계기술," 1년차 연구결과보고서, 서울대학교 농업생명과학대학, 1995
- [8] 조성인, "NMR을 이용한 On-Line 수분 측정장치의 개발," 2년차 연구결과보고서, 서울대학교 농업생명과학대학, 1995

저 자 소 개



金 暻 月(正會員)

1980년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업.
 1983년 2월 한국과학기술원 산업전자공학과 졸업(공학석사). 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사).
 1983년 3월 ~ 1987년 2월 금성반도체 연구소 주임연구원. 1990년 1월 ~ 1991년 10월 금성일렉트론 중앙연구소 책임연구원. 1991년 11월 ~ 1995년 2월 (주)대륙기전 전자기계연구소 연구소장. 1995년 3월 ~ 현재 안동대학교 전자공학교육과 조교수. 주관심분야는 애널로그 신호처리 및 집적회로설계, 계량계측 등임